第5章

3GHzまでの回路の検証ができる測定器リストと測定事例

～優れた設計者は測定にも優れる～

津野 徹

高周波回路において，回路が設計通りにできているのかを確かめる技術は，回路を設計する能力と同じくらい大切である．ここでは，第３章で紹介したようなコンポーネントの性能を測定する方法について紹介する．（編集部）

高周波測定器にとって一番大切なのはトレーサビリティ（追跡可能性）です．世界中のどの測定器で測っても，同じ値を測定できなければなりません．筆者の作成した高周波のトレーサビリティ体系を**図1**に示します．およそ20年前に作成したので，今では販売されていない測定器もありますが，測定原理はそれほど変わっていません．

高周波関係の測定器は，NIST（米国標準局; National Institute of Standard & Technology）が管理する測定器をベースに校正されています．言い換えると，NISTが管理する測定器で校正された測定器によって，校正されているのです．これを「NISTでトレーサブルされている」といいます．

写真1 米国Tektronix社のリアルタイム・オシロスコープ「TDS 3054B型」

● 3GHzまでの回路の検証ができる測定器リスト

実回路の検証に筆者が使っている測定器は次の通りです．

① DC～500MHz帯域リアルタイム・オシロスコープ（**写真1**）
② 100kHz～3GHz帯域周波数シンセサイザ
③ 9kHz～3GHz帯域トラッキング・ジェネレータ付きスペクトラム・アナライザ（**写真2**）
④ 300kHz～6GHz帯域方向性結合器（**写真3**）
⑤ 100kHz～3GHz帯域周波数カウンタ
⑥ DC～20MHz帯域ベース・バンド用2チャネル任意関数発生器
⑦ 4チャネル・マルチトラッキング電源

これくらいの測定器がそろっていれば，3GHzまでの回路が検証できます．これにネットワーク・アナライザ（500万円以上）があれば完ぺきなのですが，筆者はコストの面で③9kHz～3GHz帯域のトラッキング・ジェネレータ（オプション）付きスペクトラム・アナライザ（米国Agilent Technologies社のE4403B）を使っています（**写真2**）．これと④方向性結合器（Agilent Technologies社の86205A，**写真3**）を一緒に使用すると，スカラ・ネットワーク解析（*S*パラメータ測定）が行えます．

通常の伝送回路と反射のテストには上記で十分です．コストも⑦までそろえても500万円以下で納まります．ただし，ベクトル測定を行えないので，スミス・チャート表示や群遅延は測定できません．

最近は従来のアナログ方式とダイレクト・コンバージョン方式の長所を組み合わせたスペクトラム・アナライザ

KeyWord トレーサビリティ，NIST，周波数シンセサイザ，トラッキング・ジェネレータ付きスペクトラム・アナライザ，方向性結合器，周波数カウンタ，任意関数発生器，マルチトラッキング電源，*S*パラメータ，TDR

「RSA3303A」が，米国Tektronix社から発売されました（**写真4**）．これは短時間サンプリングで波形を捕らえ，表示できる優れものです．この方式なら，今まで不可能だったRFIDの応答波形などを測定できるので，RFIDの技術者には必須の測定器です．

写真2　米国Agilent Technologies社のスペクトラム・アナライザ「E4403B_ESA_L」

写真3 Agilent Technologies社の方向性結合器

国際機関	国際度量衡総会(CGPM) ― 国際度量衡委員会(CIPM) ― 国際度量衡局(BIPM) 米国標準局(NIST)
国家機関	通信総合研究所(CRL)　電子技術総合研究所(ETL)　計量研究所(NRLM) 日本電気計器検定所(JEMIC)　日本品質保証機構(JQA)

電気量	周波数	電力	電圧	減衰量	イミッタンス	群遅延	雑音	変復調	位相
社内標準 発生器	セシューム・ビーム標準 HP-5071A (±1.5×10-12)	パワー・センサ校正システム Weinschel-ⅡAシステム (100k-40GHz)	AC standard M. FLUKE-5700A (10Hz-1MHz)	ステップ減衰器 Weinschel-M8300 (DC-26.5GHz)	標準抵抗器	ライン・ストレッチャ	ノイズ・ソース HP-346/347 (10M-26.5 GHz)	マルチ・キャリア・ジェネレータ HP-E2507B/08A (800M-2.5 GHz)	フェーズ・シフタ
社内標準 発生器				ステップ減衰器 HP-355 (DC-1GHz)	標準コンデンサ			アジャイルS.G. HP-8791 (50M-18GHz)	
社内標準 発生器		シンセサイズドSG HP-8663A (10K-2.6GHz)	レベル・ジェネレータ HP-3335A (100-80MHz)	ステップ減衰器 HP-8497K (DC-26.5GHz)	標準インダクタ			ウェーブフォーム・ジェネレータ 横河AG-5100 (DC-1GHz)	ウェーブフォーム・ジェネレータ 横河AG-4100 (DC-400MHz)
社内標準 測定器	マイクロ波カウンタ HP-5350B (10Hz-40GHz)	サーミスタ・マウント Weinschel-M1118 (50M-26.5 GHz)	AC standard S. FLUKE-5790A (10Hz-1MHz)	減衰量測定システム Weinschel-M8850 (10M-18GHz)	プレシジョンLCRメータ HP-4284A/85A (20Hz-30MHz)	ネットワーク・アナライザ HP-8510T (45M-110GHz)	ノイズ・フィギュア・メータ HP-8970B (10M-1.6 GHz)	メジャリング・レシーバ HP-8902A (150k-1.3 GHz)	ネットワーク・アナライザ HP-8510T (45M-110 GHz)
社内標準 測定器	タイム・インターバル・カウンタ HP-5370B (10S-100MHz)	パワー・メータ HP-437B (100k-110 GHz)	RFボルト・メータ Boonton-9200C (10k-1.2GHz)	メジャリング・レシーバ HP-8902A (150k-1.3GHz)	ゲイン・フェーズ・アナライザ HP-4194A (10Hz-40MHz)	ネットワーク・アナライザ HP-8751A (5Hz-500MHz)	SSBノイズ・メジャメント HP-3048AR (5M-18 GHz)	ベクトル MOD.アナライザ HP-8981B (50M-200 MHz)	ベクトル・シグナル・アナライザ HP-89441A (DC-2.65 GHz)
社内標準 測定器	MOD.ドメイン・アナライザ HP-53310A (10S-200MHz)	スペクトラム・アナライザ HP-8566B (100Hz-22GHz)		ゲイン・フェーズ・アナライザ HP-4194A (10Hz-40MHz)	RFインピーダンス・アナライザ HP-4291A (1MHz-1.8GHz)			ビデオ・シグナル・アナライザ Tektronix VM700	ベクトル電圧計 HP-8508A (100k-2 GHz)

図1　筆者の作成した高周波のトレーサビリティ体系

高周波測定器にとって一番大切なのはトレーサビリティである．世界中のどの測定器で測っても同じ値を測定できなければならない．米国Hewlett Packard社（現在はAgilent Technologies社）のネットワーク・アナライザ「HP-8510T」は，20年前4000万円もしただけあって，現在でも第1級の性能を誇っている．高周波コンポーネントの会社のカタログにはHP-8510Tの写真が載っていることが品質の証明書のようなものだった．

● 難しくないSパラメータ

Sパラメータというと，突然拒否反応を起こしてしまう読者が多いと思います．筆者も昔はそうでした．けれどもY，Z，H，Fなどといったほかのパラメータに比べて，これほど物理現象に密接に関係したパラメータはありません．

高周波は，低周波では無視できるいろいろな要素が無視できません．シミュレーションも困難なため，回路網全体の実測データをパラメータとしてしまったのです． 高周波をマスタするためには避けて通れない道です．この機会にぜひともマスタしてください．

S_{11}：入力インピーダンスを表す．正確には入力ポートの反射電力を表す．表示は不整合減衰量（Return Loss）で表される．

S_{21}：周波数特性を表す．正確には入力から出力への伝送係数を表す．

S_{22}：出力インピーダンスを表す．正確には出力ポートの反射電力を表す．

S_{12}：入出力アイソレーションを表す．正確には出力から入力への逆伝送係数を表す．

図2にSパラメータ測定の概略を示します．今，S_{11}の測定例を図3に示します．測定信号が2本ありますが，上側の線がS_{11}がオープンのときの信号であり，基準レベルとなります．入力が0dBなのに，なぜ－18dBmになるかというと，方向性結合器の結合損失が－18dBだからです．下線は50Ω終端時の特性です．国産のものは入力とのアイソレーションが－20dBくらいしか取れません．

ここが重要！ Agilent Technologies社のものは，入力とのアイソレーションが－30dB以上取れるので，標準器として使用できます．

次にパッチ・アンテナ（写真5）のS_{11}特性を，図4に示します．2.45GHz付近で20dB以上の減衰が観測できますから，優秀なアンテナということになります．S_{11}が－20dB以上取れれば，ケーブルやコネクタの規格と同じで，1％のパワー・ロスしかありません．99％のパワーを伝送できます．

表1にSパラメータと$VSWR$（電圧定在波比）の関係を示します．$VSWR$が1.2のとき，S_{11}が－20dBとなります．ちなみに$VSWR$が1.5という値は，50Ω終端ではなく75Ω終端としたとき（ミスマッチのとき）の値です．このときでも96％の電力が伝送できています．極端な話，とにかく終端しておけばよいのです．

筆者が経験した携帯電話の出力アンプの検査においては，検査仕様書の規格は$VSWR$＜2でした．これでも10％のパワー・ロスしかありません．

写真4 Tektronix社のリアルタイム・スペクトラム・アナライザ「RSA3303A」

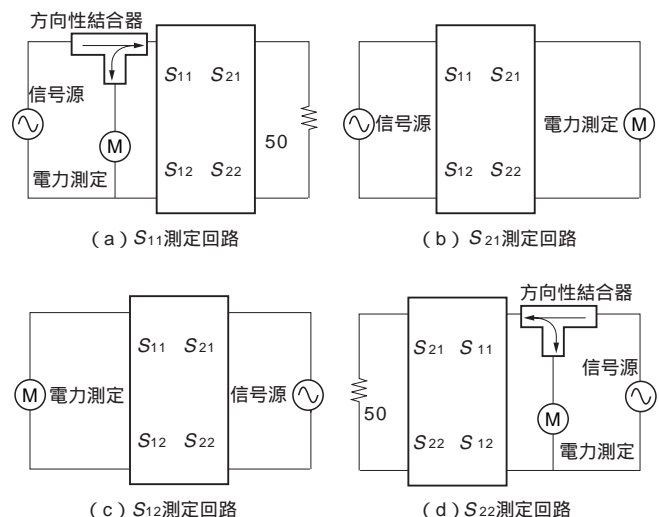



図2 Sパラメータの測定

S_{11}は入力インピーダンスを表す．S_{21}は周波数特性を表す．S_{22}は出力インピーダンスを表す．S_{12}は入出力アイソレーションを表す．

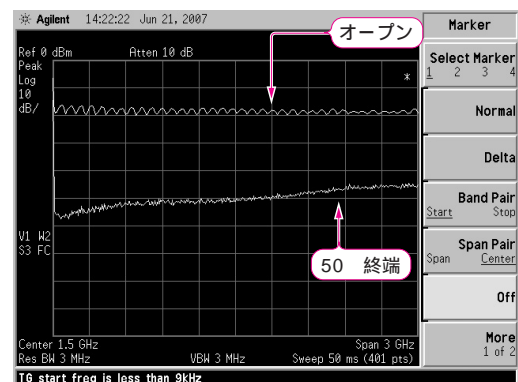



図3 オープンと50Ω終端時のS_{11}の測定例

写真5　2.5GHzパッチ・アンテナの例

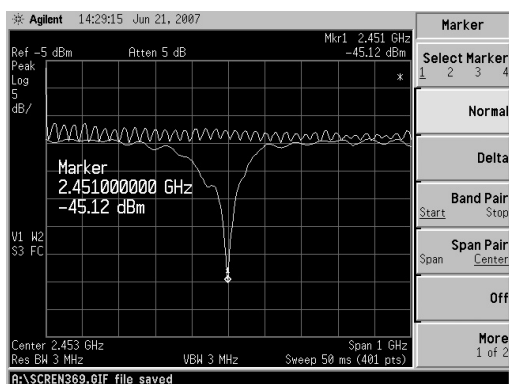
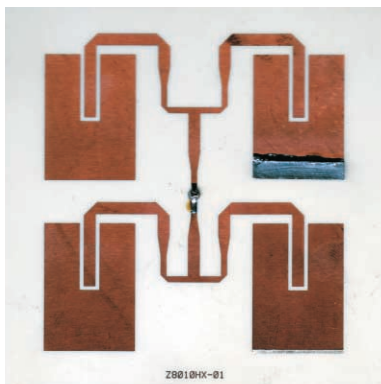



図4　パッチ・アンテナ(写真5)のS_{11}特性
2.45GHz付近で20dB以上の減衰が観測できる．

表1　*S*パラメータと*VSWR*の関係

電圧定在波比 *VSWR*	デジベル表記した*VSWR* [dB]	(S_{11}/S_{22}) 不整合減衰量 [dB]	(S_{11}/S_{22}) 反射電力 [%]	(S_{21}/S_{12}) 伝達電力 [%]	(S_{21}/S_{12}) 損失電力 [dB]	(S_{11}/S_{22}) 電圧反射係数
1	0	∞	0	100	0	0
1.1	0.8	26.4	0.2	99.8	0.01	0.05
1.2	1.6	20.8	0.8	99.2	0.036	0.09
1.3	2.3	17.7	1.7	98.3	0.075	0.13
1.4	2.9	15.6	2.8	97.2	0.122	0.17
1.5	3.5	14	4	96	0.177	0.2
1.6	4.1	12.7	5.3	94.7	0.238	0.23
1.7	4.6	11.7	6.7	93.3	0.302	0.26
1.8	5.1	10.9	8.2	91.8	0.37	0.29
1.9	5.6	10.2	9.6	90.4	0.44	0.31
2	6	9.5	11.1	88.9	0.512	0.33
2.5	8	7.4	18.4	81.6	0.881	0.43
3	9.5	6	25	75	1.249	0.5
∞	∞	0	100	0	∞	∞

約20dB　96%

● アンプ，フィルタ，アッテネータの測定

アンプ，フィルタ，アッテネータなどの*S*パラメータは，ネットワーク・アナライザで測定します．プリント基板のインピーダンス特性も，以前は専門のTDR(Time Domain Reflectometry)測定器を使っていましたが，最近ではネットワーク・アナライザで測定した周波数特性を逆フーリエ変換してTDR特性を表示できるようになりました．そのため，高価なTDR測定器を購入する必要がなくなりました．

① アンプ測定(図5)

入力信号はアンプの増幅度分だけ下げて入力します．出力レベルも＋20dBmを超えないように注意します．通常のネットワーク・アナライザの入力は＋30dBm(1W)程度となっているので，これ以上の値を入力すると機器を破壊してしまいます．

② フィルタ測定

フィルタは，使用帯域の10倍の周波数まで減衰量が確保されているかをチェックします．特に10GHz以上はシールド・ケースが共振し，入出力コネクタだけで信号が通過してしまうため，最初の設計が肝心です．ストリップ・ラインで作成すれば，10GHz以上のフィルタはプリント基板の厚さの1/2波長の周波数まで共振しません．

③ アッテネータ測定

アッテネータの*S*パラメータは，ネットワーク・アナライザの振幅精度に注意しながら測定します．以前，－60dBの測定を行った際に，某国産メーカのスペクトラム・アナライザの目盛りに誤差があって，大変な思いをしました．これもトレーサビリティの取れていないものだったのですね．10dBのステップ・アッテネータを利用して，自分の使っているスペクトラム・アナライザの目盛りの精度をチェックしておきましょう．

● 検波器の測定

検波器は高周波を直流に変換するため，ネットワーク・アナライザが使えません．原始的ですが，周波数シンセサイザとパワー・メータを使い，レベル特性と周波数特性を測定します(図6)．パソコンでプログラムを組み，GPIB(General Purpose Interface Bus)経由で信号の発生と測定を自動で行った場合，効率と測定データの再現性が上がります．

● 発振器の測定

発振器は一番測定の難しいデバイスです．測定パラメータが多く，それぞれに高い測定精度が要求されるからです．

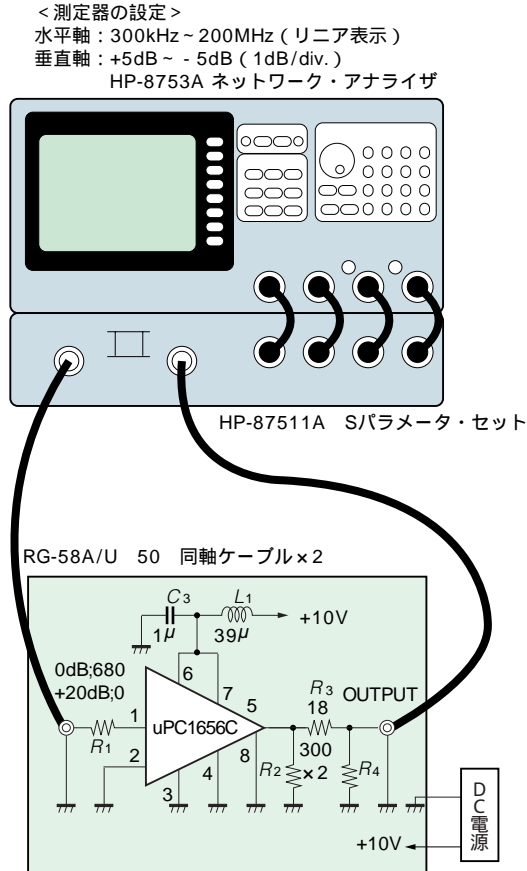



図5 高周波アンプの測定例

入力信号はアンプの増幅度分だけ下げて入力する．出力レベルも＋20dBmを超えないように注意すること．

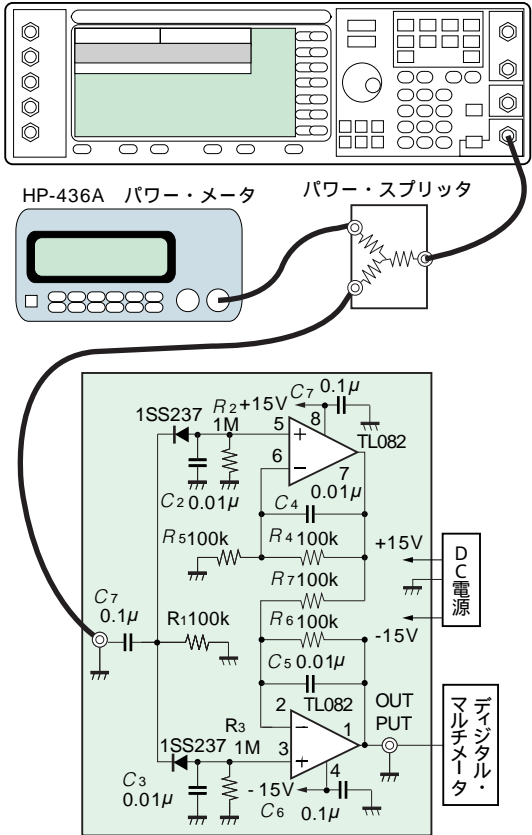



図6 検波回路の測定例

周波数シンセサイザとパワー・メータを使い，レベル特性と周波数特性を測定する．

(a) 周波数の測定

これは意外と簡単です．セシウム・ビームやルビジウムという原子標準が利用できるからです．これら原子標準と値を突き合わせれば，ppb（Part Per Billion；10^{-9}）以上の校正も可能です．

1次標準器（原子共振器）のセシウム・ビーム発振器（HP-5071A）で水晶発振器（HP-105B）を値付けします．この値を2次標準とし，常用標準の測定器を校正します．

なぜ，こんなに手間をかけるかというと，1次標準器は長期安定度（5×10^{-14}/30日）や確度（1×10^{-12}）は良いのですが，大きく，重く，高価です．しかも，周波数が安定するまでに時間がかかったり，電源を入れ続けたり，標準器室で温度管理をしたりなどと手間がかかります．そのような理由から長期安定度（5×10^{-10}）が小さく，軽く，安価な水晶発振器を値付けして，周波数カウンタなどを校正して運用するのです．

(b) SSBノイズの測定

SSB（Single Sideband）ノイズの測定は，周波数の揺らぎを測定するものです．基準となる正確な水晶発振器と比較して，その差を測定します（図7）

(c) スプリアスの測定

発振器はすべての帯域で自分以外の信号を発生してはいけません．自分以外の高調波を除く信号をスプリアスといいます．スプリアスはスペクトラム・アナライザで測定します．このときも測定ケーブルからのノイズの混入などに注意が必要です．

(d) 出力レベルの測定

高周波で一番難しいのがレベル測定です．それはレベルと周波数で2次元のマトリックスとなるからです（図8）．このマトリックスのすべての点でレベルがトレーサブルされていなければなりません．

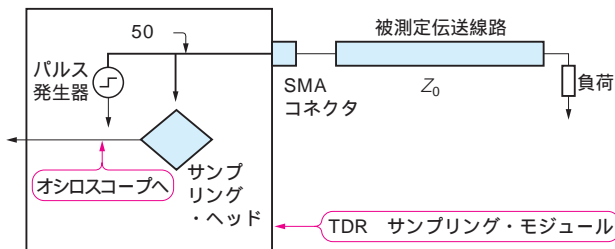
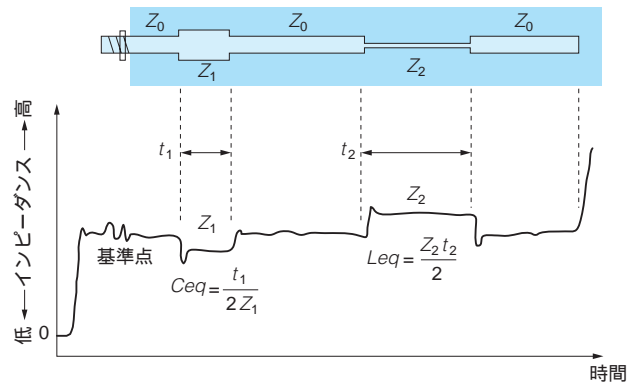
横軸は周波数特性のよいパワー・メータで測定します．このパワー・メータはNISTトレーサブルの固定発振器で

コラム　TDR測定法

集中定数の測定には*LCR*メータを使いますが，分布定数回路の測定にはTDR測定法が有効です．簡単にいうと，伝送回路の反射波形を測定して，伝送回路のインピーダンスを測定する方法です．**図A**に原理図を示します．高速なパルス波形を用いて伝送回路を駆動し，反射してくる波形を，高速なオシロスコープで測定します．

ピコ秒単位のパルスを使うので，通常は測定システムとして販売されています（例えばTektronix社DSA8200型サンプリング・オシロスコープと80E10型サンプリング・モジュール）．

TDR測定時の反射波形例を**図B**に示します．始めに基準点（基準電圧）が観測され，次に50Ωの伝送線路を通って往復した平たん部の電圧が観測され，最後に開放端の2倍の電圧が観測されます．この平たん部でインピーダンスを測定します．平たん部が基準電圧と同じなら50Ωとなります．インピーダンスが低ければ反射電圧は小さく，高ければ大きくなる様子が観測できます．測定系の分解能は立ち上がり時間の1/2となります．80E10型サンプリング・モジュールは，12psと短い立ち上がり時間なので，ガラス・エポキシ基板（FR-4）上の配線パターンにおいて，1mmの分解能（6ps）を得られます．

さらにTDR波形から50GHzまでの*S*パラメータを算出することも可能となりました．最近では，*S*パラメータから逆FFT変換でTDR特性を表示できるネットワーク・アナライザも出てきました（Agilent Technologies社のN5242Aベクトル・ネットワーク・アナライザ）．従って，TDR付きサンプリング・オシロスコープか，TDR付き50GHz帯ネットワーク・アナライザのどちらかを購入すれば良いことになります．2台分のコストを1台に投資できます．良い時代になりましたね．

図A　分布定数回路の測定に向くTDR測定法
伝送回路の反射波形を測定して，伝送回路のインピーダンスを測定する方法．

図B　TDR測定時の反射波形例

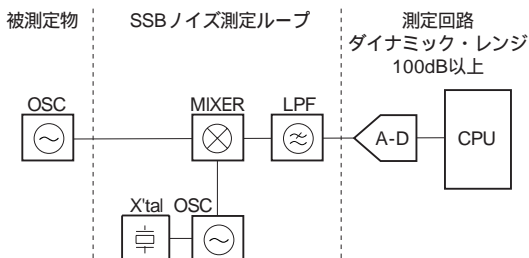



図7　SSBノイズの測定法
基準となる正確な水晶発振器と比較して，周波数の揺らぎを測定する．

絶対レベルを校正します．この横軸を基準に縦軸は選択レベル計（スペクトラム・アナライザ）で校正します．このようにして高周波のレベル・マトリックスのすべての点で高い精度が得られます．

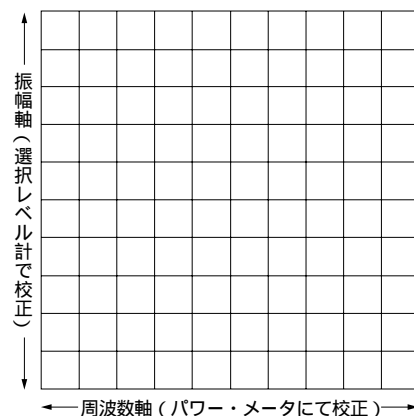



図8　高周波レベルの校正マトリックス
すべての点でレベルがトレーサブルされていなければならない．

つの・とおる
横河電機（株）